

# Der Natureispalast, eine Gletscherhöhle im Tuxer Ferner (Zillertaler Alpen, Tirol)



## ZUSAMMENFASSUNG

Im Randluftbereich des Tuxer Ferners liegt auf rund 3200 m Seehöhe ein natürliches System aus Gletscherspalten, die z.T. wassererfüllt sind und durch einen Windkolk randlich angeschnitten wurden. Seit der Entdeckung im Jahr 2007 wurde diese Gletscherhöhle durch künstliche Erweiterungen und neu geschaffene Verbindungen auf derzeit rund 1 km Ganglänge ausgedehnt und als sogenannter Natureispalast der Öffentlichkeit im Rahmen von Führungen zugänglich gemacht. Dank der leichten Erreichbarkeit (Gletscherschigebiet) ist diese hochalpine Attraktion ganzjährig geöffnet. Die Vermessung hat ergeben, dass neben der markanten Randluft an der Westflanke der Gefrorene-Wand-Spitze eine Schar subparalleler vertikaler Zerrspalten vorliegt, die ebenfalls annähernd N-S streichen. Die Dynamik dieser Spalten ist sehr gering, und auch Messungen an der Randluft haben keine Bewegung innerhalb von ca. 11 Jahren ergeben. Wie Temperaturdaten zeigen, ist der Gletscher nicht nur am Fels der Randluft, sondern auch an seinem Felsbett unterhalb des Natureispalasts angefroren. Allerdings sind die gemessenen Temperaturen nur knapp unter dem Gefrierpunkt. Das Vorliegen eines sogenannten kalten Gletscherbereichs, der nur interne Eisdeformation und kein basales Gleiten aufweist, erklärt auch die geringen Bewegungsraten, die zwischen Felsbasis und dem Oberrand des 36 m tiefen Forschungsschachts gemessen wurden (ca. 22 cm pro Jahr in horizontaler Richtung). Somit ist der Natureispalast eine Ausnahmerecheinung im Vergleich zu anderen touristisch zugänglichen Gletscherhöhlen und -tunneln in den Alpen, die meist im Zungenbereich liegen und daher eine deutlich höhere Dynamik zeigen.

## ABSTRACT

### **Natureispalast, a glacier cave in the Tux Glacier (Zillertal Alps, Tyrol).**

In the randluft area of the Tux Glacier at about 3200 m above sea level lies a natural system of glacial crevasses, which are partly filled with water and were cut at the edge by a wind scoop. Since its discovery in 2007, this glacier cave has been artificially extended to a current passage length of 1 km and has been made accessible to the public as a so-called Natureispalast within the framework of guided tours. Thanks to the easy accessibility (glacier ski area), this high alpine attraction is open all year round. A survey has revealed that, in addition to the prominent randluft on the western flank of the Gefrorene Wand peak, there is a series of sub-parallel vertical fissures that also strike approximately N-S. The dynamics of these crevasses is very low, and measurements at the randluft have not revealed any movement within about 11 years. As temperature data show, the glacier is not only frozen to the rock at the randluft, but also to the rock beneath the glacier cave. However, the measured temperatures are only just below freezing. The fact that a so-called cold glacier is present, showing only internal ice deformation and no basal sliding, also fits well with the low rates of movement measured between the rock base and the upper rim of a 36 m-deep shaft (about 22 cm per year in the horizontal direction). Thus, the Natureispalast is exceptional compared to other glacier caves and tunnels accessible to tourists in the Alps which are mostly located in the glacier tongue area and therefore show much higher dynamics.

### **Christoph Spötl**

[christoph.spoetl@uibk.ac.at](mailto:christoph.spoetl@uibk.ac.at)

### **Tabea Gaugler**

[tabea.gaugler@student.uibk.ac.at](mailto:tabea.gaugler@student.uibk.ac.at)

### **Tanguy Racine**

[tangracine@gmail.com](mailto:tangracine@gmail.com)

Institut für Geologie, Universität Innsbruck,  
Innrain 52, 6020 Innsbruck

### **Roman Erler**

Natursport TIROL, Lanersbach 376, 6293 Tux  
[info@natursport.at](mailto:info@natursport.at)

Eingelangt: 30.5.2023

Angenommen: 10.7.2023

## EINLEITUNG

Sie sind mit Abstand die geologisch jüngsten und zugleich vergänglichsten Höhlen und werden nicht selten als Eishöhlen angesprochen: Höhlen im Inneren von Gletschern. Folgt man gängigen Definitionen (z.B. Klimchouk, 2004: 203; Ford & Williams, 2007: 209), so handelt es sich bei diesen Gletscherhöhlen aber nicht um Eishöhlen, da sie in Eis und nicht in Fels entstanden.

Die Bildung von Gletscherhöhlen kann auf Schmelzprozesse oder auf mechanische Deformationen im Eis zurückgeführt werden. Schmelzprozesse laufen zum einen englazial, d.h. im Gletscher selbst ab, zum anderen können an der Basis des Gletschers sog. subglaziale Höhlen entstehen. In beiden Fällen stammt die Wärmeenergie, die zum Schmelzen des umgebenden Eises benötigt wird, aus der Reibung des fließenden, oft unter hohem Druck stehenden Schmelzwassers, das während der sommerlichen und frühherbstlichen Ablationsperiode in das Innere des Gletschers gelangt (Gulley & Fountain, 2019). Bekannte Beispiele für durch Schmelzwasser geschaffene Höhlen sind die Gletschermühlen (Moulins), jene Stellen an der

Gletscheroberfläche, an denen Schmelzwasserflüsse – vergleichbar Ponoren in Karstgebieten – wasserfallartig in das Innere eines Gletschers stürzen. Im Winter, wenn das Schmelzwasser versiegt, fallen diese Schächte trocken und können befahren werden.

Durch das Fließen des Gletschereises entstehen Zug- und Druckspannungen, die zum Aufreißen bzw. Verschließen von Spaltenhöhlen führen, zu denen die bekannten Gletscherspalten gehören. Besonders markante Spalten bilden sich am Oberrand von Gletschern, wo aufgrund der Seehöhe die kältesten Temperaturen herrschen und das Eis zumindest stellenweise ganzjährig am Felsuntergrund bzw. an den umgebenden Felswänden angefroren ist. Aufgrund des schwerkraftbedingten Fließens des Gletschers reißen an der Grenze zur Felswand bzw. knapp unterhalb Zerrspalten auf, die als Randkluft bzw. Bergschrund bekannt sind (deutsche Namen, die auch in die englischsprachige glaziologische Literatur Eingang gefunden haben, z.B. Benn & Evans, 2010). Die Lebensdauer von Höhlen in Gletschern schwankt auf Zeitskalen von Jahren bis Dekaden, wobei Schmelzwasser-

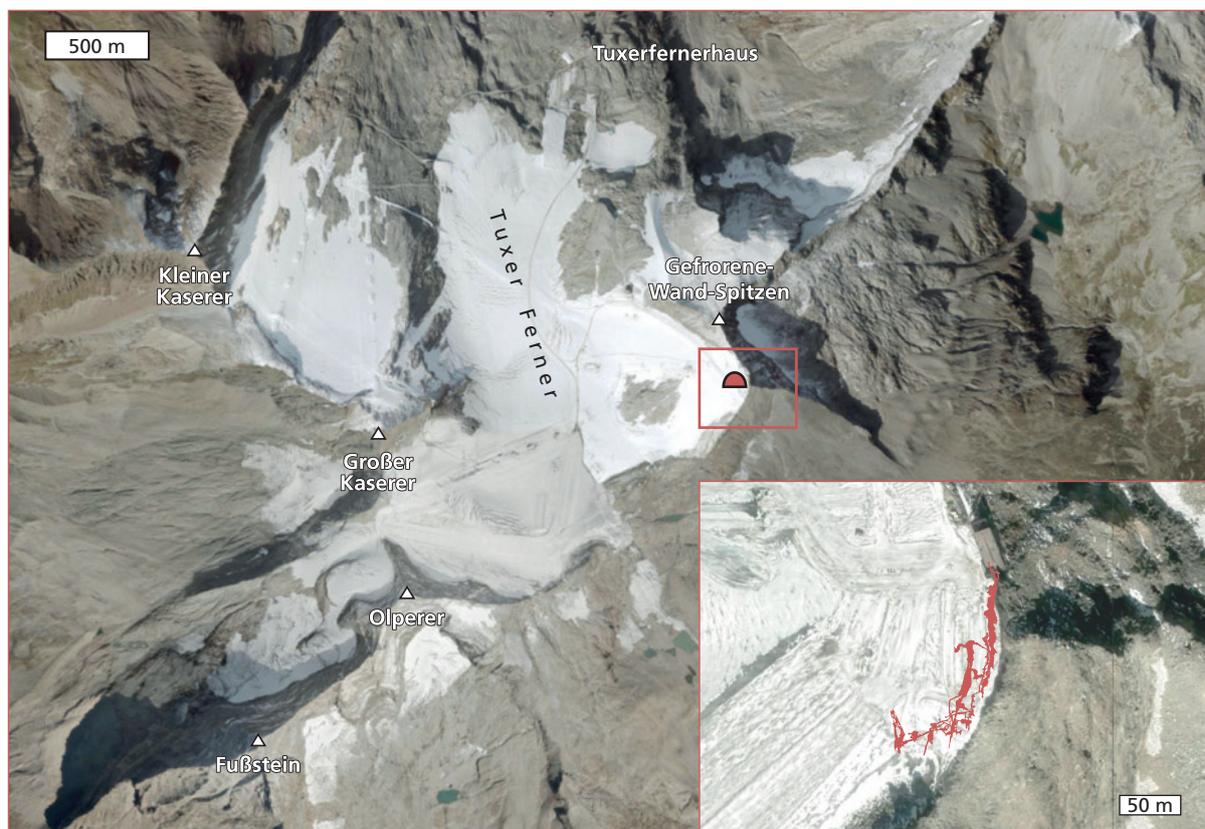


Abb. 1: Luftbild des Tuxer Ferners und seiner Umgebung mit Lage des Natureispalasts. Rechts unten der vergrößerte Ausschnitt mit Projektion des Grundrisses des Natureispalasts.

Fig. 1: Aerial image of the Tux Glacier, its environs and the position of the Natureispalast. Inset right: footprint of the Natureispalast survey.

Quelle: Laser- und Luftbildatlas Tirol (Befliegung 2019)

kanäle, besonders solche tief im Eis, oft bereits im darauffolgenden Winter durch das plastische Fließen des Eises zusammengedrückt werden, während Randklüfte und Bergschrunde deutlich länger bestehen, aber auch ständigen Veränderungen unterworfen sind, z.B. durch teilweises Auffüllen mit Neuschnee im Winter. Aufgrund ihrer Vergänglichkeit werden Gletscherhöhlen nur selten von Höhlenforschern besucht und eingehende speläologische Untersuchungen an alpinen Gletscherhöhlen sind in der Literatur rar. So vermaß beispielsweise Wolf (2003) zwei 35 m bzw. 60 m lange Gletscherhöhlen am Vernagtferner (Öztaleralpen) und Glaser (1988) berichtete von einer rund 500 m langen Gletscherhöhle im Oberaletschgletscher der Berner Alpen. Sehr gut dokumentiert ist die Eiskapelle am Königssee (1334/5) im Nationalpark Berchtesgaden. Dabei handelt es sich jedoch genau genommen nicht um eine Höhle in einem Gletscher, sondern um einen groß dimensionierten Kanal an der Basis eines lawinengenährten Schnee/Firnfeldes am Fuß der Watzmann-Ostwand (Wolf, 2005), welches bereits stark abgeschmolzen ist.

Eine Handvoll Gletscherhöhlen sind alpenweit touristisch zugänglich, wobei alle künstlich angelegt oder zumindest stark erweitert wurden (und werden). Sie sind nur in der warmen Jahreszeit geöffnet und erlauben Besuchern, auf kurzem horizontalem Weg das Innere eines Alpengletschers zu erkunden. Ostalpine Beispiele sind die sog. Eisgrotte am Stubai Gletscher, die im Zungenbereich des Schaufelferners unweit der

Bergstation Eisgrat in ca. 2900 m Höhe liegt bzw. lag, denn 2023 war sie aufgrund des Gletscherrückgangs nicht mehr begehbar, sowie ein künstlicher Eistunnel am unteren Ende des Weißseeferners (Kaunertaler Gletscherschigebiet) auf ca. 2750 m, beide in den Tiroler Zentralalpen. An der Zunge des Rhonegletschers in den Westalpen wird seit ca. 1870 jedes Jahr eine rund 100 m lange Gletscherhöhle in ca. 2300 m Seehöhe künstlich angelegt, und im Titlisgletscher, bei Engelberg in den Zentralschweizer Alpen gelegen, kann man einen rund 150 m langen Gang in 2870 m Seehöhe begehen.

Wichtige historische Beobachtungen existieren aus ehemaligen Gletscherhöhlen und -stollen der Südalpen. Im Inneren des Marmolata-Gletschers wurden während des Ersten Weltkriegs natürliche, bis zu 40 m tiefe Spalten durch künstliche Stollen verbunden und so ein kilometerlanges Netzwerk an Gängen geschaffen (Wachtler & De Bernardin, 2009). In diesen, sowie in Gletschern der Ortler-, Adamello- und Presanella-Gruppe (ebenfalls an der ehemaligen Front gelegen), wurden wichtige Beobachtungen zur Temperaturverteilung und Bewegung im Gletscher gemacht (Klebersberg, 1920).

In diesem Artikel wird das 2007 entdeckte Netz an natürlichen und z.T. wassergefüllten Spalten am Oberrand des Tuxer Ferners in den westlichen Zillertaler Alpen vorgestellt, welches sukzessive erweitert wurde und als Natureispalast bekannt ist (2515/43). Dieser stellt die mit Abstand größte Gletscherhöhle der Ostalpen dar, in der ganzjährig Führungen stattfinden.

## LAGE

Der Tuxer Ferner (offizielle Bezeichnung laut ÖK), auch Gefrorene-Wand-Kees (Alpenvereinskarte) oder Hintertuxer Gletscher genannt, bildet den Talschluss des Tuxertales, des westlichen Seitentals des Zillertals. Er wird an seiner westlichen Seite eingerahmt vom Grat zwischen Lärmstange, Kleinem und Großem Kaserer sowie dessen südlicher Fortsetzung, die im Olperer (3476 m) kulminiert (Abb. 1). Die Ostbegrenzung dieses Gletschers bilden die Gefrorene-Wand-Spitzen (3286 m).

Wie alle Alpengletscher hat auch der Tuxer Ferner in den vergangenen Dekaden massiv an Volumen und Ausdehnung verloren. Eindrucksvoll ist der Vergleich des historischen Gletscherstands von 1930 und dem

knapp 90 Jahre später, den die Alpenvereinskarte Zillertaler Alpen West (Nr. 35/1-H) zeigt. Zum Zeitpunkt des letzten Gletscherhochstands, dem Ende der sogenannten Kleinen Eiszeit um 1850, reichte die Gletscherzunge auf eine Seehöhe von etwa 1990 m hinab. Im Jahr 2019 lag die Gletscherfront auf etwa 2680 m, d.h. rund 700 m höher (Laser- & Luftbildatlas Tirol, <https://lba.tirol.gv.at>).

Der Eingang des Natureispalasts liegt nach unseren Vermessungen in 3208 m Seehöhe, knapp westlich der Gefrorene-Wand-Spitzen, und somit in einem der höchstgelegenen Teile des Tuxer Ferners. Der Zustieg ist in wenigen Minuten von der Bergstation des Gletscherbus III aus möglich.

## ENTDECKUNG UND AUSBAU ZUR SCHAUHÖHLE

Der Natureispalast ist auf eine Zufallsentdeckung im August 2007 zurückzuführen. Auf der Skipiste Nummer 5, wenige hundert Meter südöstlich der Bergsta-

tion des Gletscherbus III, entdeckte Roman Erler in der steilen Eisflanke eines damals existierenden Windkolks einen etwa 15 cm schmalen Spalt. R. Erler erweiterte

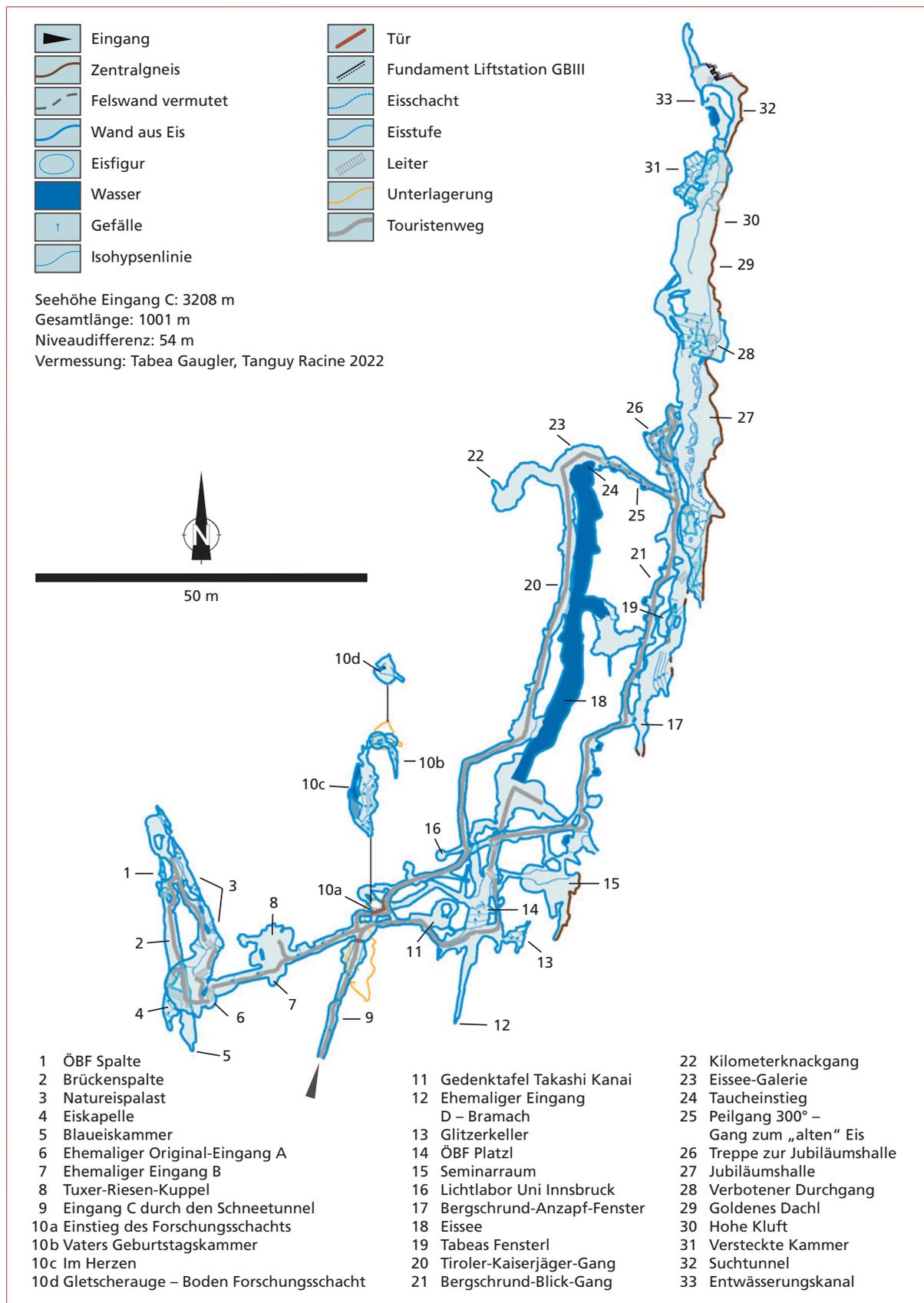


Abb. 2: Grundriss des Natureispalasts.  
 Fig. 2: Plan view of Natureispalast.

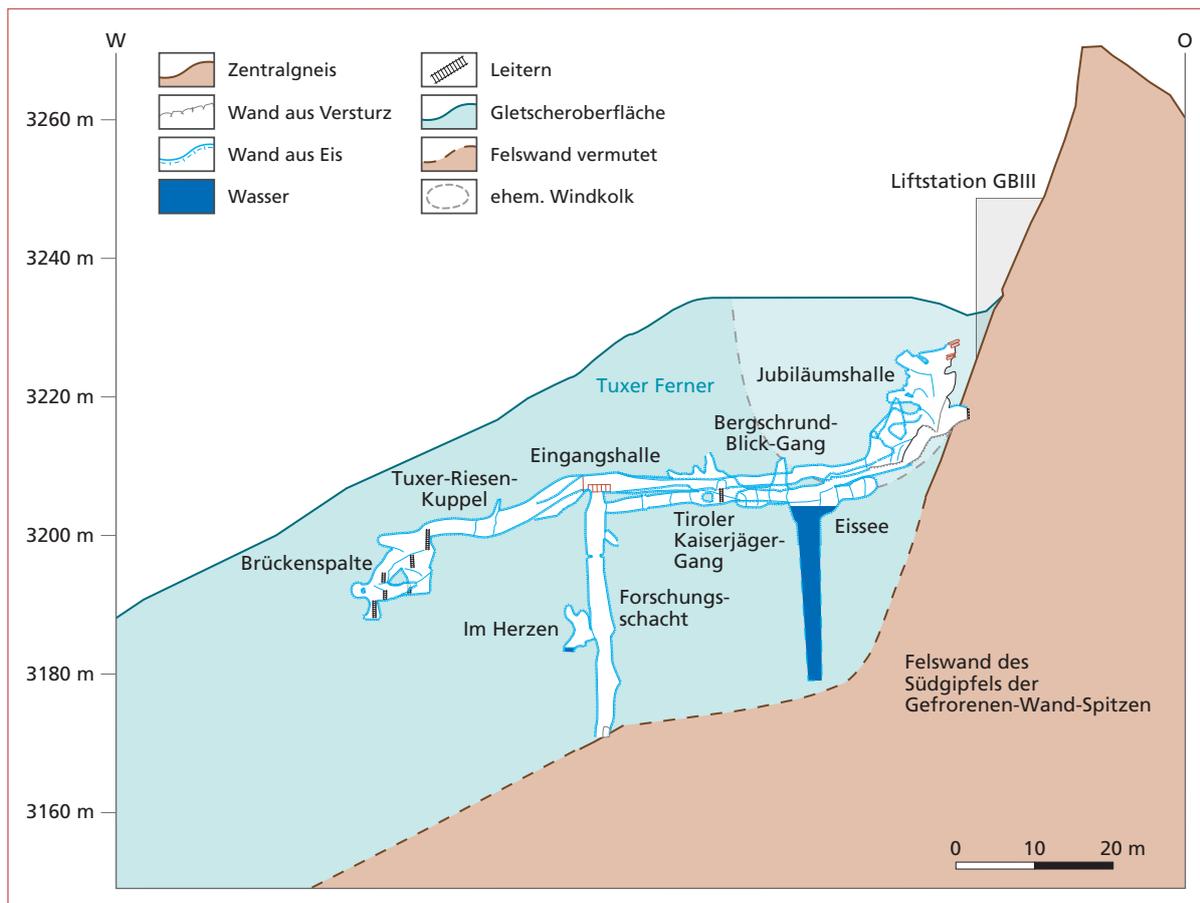


Abb. 3: Vereinfachter Aufriss in W-E-Richtung durch den Gipfelgrat der Gefrorenen-Wand-Spitzen und den obersten Teil des Tuxer Ferners mit Lage des Natureispalasts sowie des ehemaligen Windkolk angrenzend an die Felswand (gepunktete Linie oberhalb des Eissees).

Fig. 3: Simplified W-E projection through the summit ridge of Gefrorene Wand Spitzen and the upper reaches of the Tux Glacier, highlighting the position of the Natureispalast and a former wind scoop adjacent to the rock cliff (dotted line above the Eissees).  
Zeichnung/drawing: Tanguy Racine

die Öffnung (Original-Eingang A, Abb. 2) und fand im Inneren einen großräumigen Hohlraum vor und eine Kluft mit gefrorenen Eisfällen, die er *Natureispalast* taufte. In weiterer Folge wurde dieses Spaltensystem mit Leitern und Sicherungen versehen, und im November 2008 fanden die ersten Führungen statt. Damals mussten die Besucher noch abgeseilt werden, um zum Eingang zu gelangen. Im Winter 2008/09 wurde der nördliche Teil dieses Windkolk mit Pistengeräten mit Neuschnee zugeschoben, wodurch die Abseilaktionen zum Betreten der Gletscherhöhle wegfielen. Mit den Jahren wurde die Höhle sukzessive ausgebaut und weitere natürliche Hohlräume durch künstliche Stollenverbindungen angeschlossen. Um den Gästen bei Schlechtwetter einen Aufenthalt in der Höhle zu ermöglichen, wurde im Herbst 2009 die *Tuxer-Riesen-Kuppel* genannte kleine Halle künstlich im Gletscher angelegt. Sie wurde damals vom ehemaligen Eingang B aus (Abb. 2) betreten. 2010 wurde der heute aktuelle Eingang (Eingang C) geschaffen, der

durch einen Schneetunnel in das Höhlensystem führt. Von diesem Eingang aus wurde 2011 ein Gang nach Osten gegraben, welcher entlang des *ÖBF Platzls* verläuft und diesen mit dem *Eissees* verbindet.

Um Einblicke in die Tiefe des Gletschers zu erhalten, begann R. Erler Anfang 2012 mit Arbeiten am *Forschungsschacht* (Abb. 2). In ca. 10 m Tiefe stieß er auf einen natürlichen wassererfüllten Hohlraum (*Vaters Geburtstagskammer*). Ende 2013 bohrte er in ca. 26 m Tiefe einen Hohlraum an, der mit Wasser und unter Druck stehender Luft gefüllt war, wodurch eine Fontäne aus Wasser und Luft in die Höhe schoss. Nach Abklingen des Drucks stand das Wasser am damaligen Grund des Schachts etwa 2 bis 3 m hoch und musste abgepumpt werden, um die Grabungsarbeiten weiterführen zu können. Heute wird dieser natürliche, sich nach Süden ausdehnende Raum *Im Herzen* genannt (Abb. 2). Etwas tiefer wurde bald danach ein weiterer Hohlraum, die *Blaukammer*, angetroffen, die heute jedoch nicht mehr existiert. Interessant ist die Beobachtung, dass an

den Wänden im oberen Teil von *Vaters Geburtstagskammer* große Eiskristalle beobachtet wurden (s.u.), die sich unter Wasser gebildet hatten, während sich in den beiden tiefer gelegenen Kammern (*Im Herzen*, *Blaueiskammer*) keine solchen Eiskristalle befanden.

Ebenfalls im Jahr 2013 versuchte Roman Erler die Felswand an der östlichen Seite der Randkluft zu erreichen, wobei er das *Bergschrund-Anzapf-Fenster* anbohrte (Abb. 2). Wie beim Anschneiden des Hohlraums *Im Herzen* im *Forschungsschacht* schoss unter Druck stehendes Wasser heraus, welches im Randkluftbereich eingeschlossen war. Die Schüttung war vergleichbar der eines kleinen Bachs. Nachdem das Wasser abgefließen war, wurden in dem nun trockenen Abschnitt wiederum große Unterwasser-Eiskristalle festgestellt. Der Grund des 36 m tiefen *Forschungsschachts* und damit das Gletscherbett wurde im Jänner 2014 erreicht.

Ende 2016 entdeckte Roman Erler im Zuge von Vortriebsarbeiten einen weiteren großen Hohlraum, die *Jubiläumshalle*. Mit den Treppen zur *Jubiläumshalle*

konnte das neu entdeckte große Hohlraumssystem entlang der Randkluft mit dem bestehenden System verbunden werden. Jüngste Teile sind der *Suchtunnel*, der 2019 gebaut wurde, um die Fundamente der Bergstation Gletscherbus III zu erreichen. In der Mitte der *Jubiläumshalle* wurde ein kleiner Verbindungsstollen angelegt. Seit Mitte 2022 wird am NW-Ende des *Eissees* ein neuer Stollen vorgetrieben, der sukzessiv erweitert und *Forschungsgang* genannt wird. Inzwischen ist der Natureispalast eine Attraktion für Touristen aus aller Welt geworden. Zahlreiche Filmteams lockt die Schönheit und Einzigartigkeit dieser hochalpinen Höhle. Mit Schwimmen und Tauchen im *Eissee* bietet diese Extremsportlern und Abenteuerlustigen auf rund 3200 m Höhe eine spannende Herausforderung. Der eine oder andere Weltrekord wurde hier bereits aufgestellt. Auch eine Schlauchbootfahrt im *Eissee* ist im Besucherprogramm inkludiert (und wurde behördlich bewilligt). Seither beherbergt der Natureispalast Europas höchstgelegenes Schifffahrtsunternehmen.

## VERMESSUNG

Von März bis Juni 2022 haben Tabea Gaugler und Tanguy Racine den Natureispalast vermessen, mit allen Über- und Unterlagerungen insgesamt 1001 m an Länge. Der Höhenunterschied des Höhlensystems

beträgt 54 m. Besonders interessante Elemente des Natureispalasts sind der *Forschungsschacht* mit 36 m Tiefe, der *Eissee*, dessen Wasseroberfläche auf 3208 m liegt, sowie die Randkluft im Nordosten der Höhle.

## VERFÜLLTE WINDKOLKE

Wie historische Luftbilder (Laser- & Luftbildatlas Tirol) zeigen, existierten früher zwei Windkolke am Oberland des Gletschers, die durch ihren halbmondförmigen Grundriss auffielen (Abb. 4). Beim Bau der Bergstation des Gletscherbus III wurde 1999/2000 begonnen, den nördlichen der beiden Windkolke sukzessive mit Schnee zu verfüllen. Wo früher am Westfuß der Gefrorene-Wand-Spitzen dieser tiefe, Halfpipe-artige Kolk lag, kann man heute eben über Schnee bzw. Firn zur senkrecht im Osten aufragenden Felswand gehen.

Südwestlich an diesen Windkolk anschließend gibt es einen zweiten Windkolk, der SW-NE orientiert ist und an dessen Flanke der Originaleingang A des Natureispalasts lag (Abb. 4). Der Nordrand dieses Windkolks wurde im Winter 2008/2009 zum Zweck der leichteren Zugänglichkeit der Gletscherhöhle mit Pistengeräten zugeschoben. Wäre der nördliche Windkolk nicht verfüllt worden, dann wären einige Bereiche des Natureispalasts nicht existent bzw. unzugänglich.

## EISTYPEN UND -FORMATIONEN

Aus der obigen Beschreibung geht hervor, dass Teile des Natureispalasts in Bereichen liegen, die ehemalige Windkolke darstellen, die mit Schnee verfüllt wurden. Somit sind zwei Typen von Eis bzw. Firn in dieser Höhle anzutreffen: „Altes“ Gletschereis/firn, sowie Eis bzw. Firn, der maximal etwa 23 Jahre alt ist. Beide Typen sind untertage schwer voneinander zu unterscheiden,

und nur lokal, z.B. im *Peilgang*, markiert eine dünne schwärzliche Zone die Grenze bzw. die Oberfläche des ehemaligen Windkolks. Ein typisches Merkmal für den jüngeren Firn der Kolkfüllung ist das Fehlen einer Schichtung, was auf die Durchmischung des Schnees im Zuge des Zuschiebens der Windkolke zurückzuführen ist.

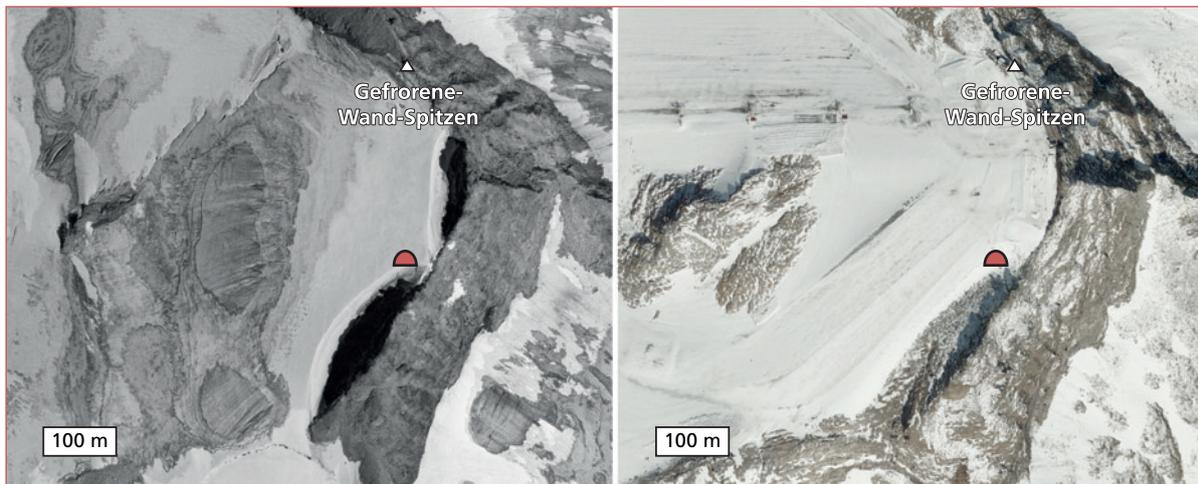


Abb. 4: Orthofotovergleich des obersten östlichen Teils des Tuxer Ferners im Bereich des heutigen Natureispalasts zwischen 1970–1974 (links) und 2016 (rechts) mit der Lage der beiden Windkolke sowie des Felsrückens wenige hundert Meter westlich unterhalb der Gletscherhöhle. Der Eingang des Natureispalasts ist rot markiert.

*Fig. 4: Comparison of two orthomosaics of the eastern upper reaches of the Tux Glacier, in the region of today's Natureispalast, between 1970–1974 (left) and 2016 (right), showing the position of the wind scoops as well as the rock ridge a few hundred metres west below the glacier cave. The entrance of the Natureispalast is marked by the red symbol.*

Quelle: Laser- und Luftbildatlas Tirol



Abb. 5: Im Randluftbereich des Natureispalasts herrschen ganzjährig Minustemperaturen und das Eis ist oft glasklar.

*Fig. 5: In the randluft area of the Natureispalast, temperatures are negative all year long and the ice is often completely transparent.*

Foto: Christoph Spötl

Der Natureispalast weist beeindruckende Wassereisformationen auf. Eissäulen, Eisstalaktiten, Eisstalagmiten und Eisvorhänge bestehen nicht selten aus glasklarem Eis (Abb. 5). Dieses entsteht durch gefrierendes Schmelzwasser, welches sich in der Höhle bildet oder von oben durch Spalten ins Höhlensystem eintritt. Durch das Eigengewicht bzw. durch den Druck innerhalb des Gletschers kommt es zu spektakulären Deformationen dieser Eisfiguren (Abb. 6).

Eine Besonderheit, die bereits erwähnt wurde, sind große Eiskristalle, die nach dem Ablassen ehemals wassererfüllter Spalten und Hohlräume angetroffen wurden. Die Kristalle erreichen bis zu ca. 50 cm Länge und sind oft dendritisch aufgebaut (Abb. 7).

Ein weiteres verbreitetes Winter- und Frühjahrsphänomen im Natureispalast ist Raureifbildung. Tritt sehr kalte Außenluft in das Höhlensystem ein und mischt sich mit der wärmeren Höhlenluft, so kann es zur Resublimation des Wasserdampfs und zum Wachstum von hexagonalen oder nadeligen Raureifkristallen von bis zu ca. 30 cm Durchmesser kommen. Damit ist Raureif ein Indiz für Lufteintritte ins Höhlensystem.

Nicht verwunderlich ist, dass besonders im Eingangsbereich des Natureispalasts Raureif anzutreffen ist. Außerdem kommt er im Bereich der beiden ehemaligen Eingänge vor, was darauf hinweist, dass dort noch luftdurchlässige Spalten existieren.



Abb. 6: Durch ihr Eigengewicht deformierte Wassereisformationen sind im Natureispalast häufig anzutreffen.

*Fig. 6: Ice formations deformed under their own weight are often found in the glacier cave.*

Foto: Christoph Spötl



Abb. 7: Unter Wasser gewachsene dendritische Eiskristalle aus dem Natureispalast.  
Fig. 7: Dendritic ice crystals formed underwater in the Natureispalast.

Foto: Roman Erler

## SPALTEN

Obwohl der Natureispalast im Wesentlichen ein Netz natürlicher Spalten darstellt, die künstlich verbunden wurden, fallen dem Besucher nur wenige Spalten auf. Das hat damit zu tun, dass beim Ausbau der Schauhöhle enge Spalten künstlich erweitert wurden und dass andererseits embryonale Spalten mit Öffnungsweiten von wenigen Zentimetern nicht häufig sind. Der Verlauf der Spalten ist meist geradlinig, teils geschwungen. Die Spalten keilen nach oben oder unten aus (Abb. 8), einzelne können über mehrere Gänge und Eiswände verfolgt werden. Die Kartierung hat

gezeigt, dass Spalten in den Bereichen *Forschungsschacht*, *Eissee* und *Ost* weniger häufig auftreten als in den Bereichen *West* und *Süd*. Das mittlere Streichen der Spalten ist  $358^\circ$ , also etwa Nord-Süd, und damit ähnlich orientiert wie die Randkluft. Das Einfallen der Spalten beträgt circa  $90^\circ$ , d.h. sie stehen saiger. In den vergangenen zehn Jahre haben sich die Spalten im Natureispalast, sieht man von Einzelfällen ab, kaum verändert. So zeigt die Spalte im Nordbereich des *Eissee*s eine schwache Öffnungstendenz, ebenso im Bereich der *Takashi-Kanai-Gedenktafel*.



Abb. 8: Spalte an der Decke im Bereich Brückenspalte (links) und V-förmige Zerrspalte im Bereich Takashi-Kanai-Gedenktafel.  
Fig. 8: Fracture in the ceiling of the Brückenspalte area (left) and V-shaped tension fissure in the Takashi Kanai area.

Fotos: Christoph Spötl

## WASSER IM GLETSCHER

Ein interessantes glaziologisches Merkmal des Natureispalasts und ein Asset für seine touristische Nutzung ist das Vorhandensein des *Eissees*. Es handelt sich dabei um eine ganzjährig wassererfüllte Spalte im Gletscher, die nach Lotungen an einer Stelle bis zu 25 m tief ist (mündl. Mitt. Birgit Sattler – Abb. 3), meist jedoch deutlich seichter.

Wie bereits beschrieben, wurde auch beim Anbohren weiterer Hohlräume im Natureispalast Wasser angetroffen, das unter Druck stand. Im südlichen Randkluftbereich neben dem *Bergschrund-Blick-Gang* konnten Wasserstandsmarken festgestellt werden.

Nördlich davon im Randkluftbereich der *Jubiläumshalle* wurden diese jedoch nicht gefunden; diese beiden Hohlräume entlang der Randkluft hatten ursprünglich keine Verbindung zueinander.

Vor dem Bau der Fundamente der Bergstation und des dazugehörigen *Entwässerungskanals* gab es eine natürliche Spalte, durch die das Wasser nach Norden abfloss. Inzwischen hat sich die Abflussrichtung

geändert. Wasser, das durch Öffnungen im Eis oberhalb des Nordendes des Höhlensystems von der Oberfläche kommend eintritt, wird nun nach Süden abgeleitet, fließt entlang des Eisbodens der Randkluft und tritt an der Kreuzung des *Peilgangs* mit dem *Bergschrund-Blick-Gang* und den Treppen zur *Jubiläumshalle* wieder aus. Diese Beobachtung wurde auch in anderen Teilen des Systems gemacht. Bei der *Tuxer-Riesenkuppel* verschwindet ebenso Wasser und tritt unterhalb des Schachteinstiegs *Im Herzen* wieder aus.

Die Spalten mit langsamer Öffnungstendenz bei der *Takashi-Kanai-Gedenktafel* bieten dem Wasser Verbindungswege zu *Vaters Geburtstagskammer*. Dort entsteht derzeit ein Hohlraum, der sich mit Wasser füllt. Die künstlichen Entwässerungsstollen leiten den Abfluss um, z.B. zum *Forschungsschacht*. Dieser füllt sich im Sommer je nach Wassereintrag. Dass das Wasser nicht abrinnt (es wird immer wieder abgepumpt), beweist, dass in diesem Bereich im Gletscher keine tiefreichenden wasserleitenden Spalten existieren.

## FLIESSDYNAMIK DES EISES

An zwei Stellen wurden Messungen durchgeführt, um Informationen über die Geschwindigkeit des Eisfließens im Natureispalast zu erhalten. Eine Messstation wurde am nördlichen Ende des *Bergschrund-Blick-Gangs* (Abb. 2) installiert, um die Bewegungsraten im Randkluftbereich zu messen. Dazu wurde eine Metallstange in die Felswand der Randkluft eingebohr. Davor befindet sich – im Eis eingefroren – ein großer Felsblock, dessen markante Spitze als Referenzpunkt dient. Die Messungen des Abstandes der beiden Punkte zeigten über einen Zeitraum von ca. 11 Jahren bis Februar 2023 keinerlei Änderung, d.h. das Eis ist zumindest an dieser Stelle am Fels der Randkluft angefroren und bewegt sich nicht.

Eine zweite Messung wurde in vertikaler Richtung im *Forschungsschacht* installiert. Dazu wurde am Schachtkopf ein langes Pendel angebracht und am geneigten Felsboden am Grund des Schachtes ein Referenzpunkt eingebohr. Durch das langsame Hang-

abwärtsfließen des Gletschers verschob sich dieser Referenzpunkt relativ zum Pendel. Zwischen Mai 2014 und Jänner 2018 wurde das Pendel vier Mal aufgehängt, und nachdem es völlig stabil war, wurden der horizontale und vertikale Abstand der Pendelspitze relativ zum Fixpunkt im Fels sowie die Verschiebungsrichtung bestimmt. Die Auswertung der Messungen zeigt eine Fließrichtung des Eises in Richtung 251°, d.h. nach WSW, was der generellen Hangneigung entspricht. Der Fließbetrag im Messzeitraum (3 Jahre und 8 Monate) betrug 0,82 m in Horizontalrichtung und 1,78 m in Vertikalrichtung. Die mittlere monatliche (jährliche) Fließgeschwindigkeit betrug demnach 1,9 (22,4) cm in horizontaler und 4,0 (48,5) cm in vertikaler Richtung. Genau genommen dokumentieren diese Messwerte die Eisbewegung zwischen dem Oberrand des *Forschungsschachts* ca. 10 m unter der Gletscheroberfläche und dem Gletscherbett 36 m tiefer.

## TEMPERATUREN DES ANSTEHENDEN FELSENS UND EISES

In der Randkluft der *Jubiläumshalle* (früher *Kathedrale* benannt) wurde zwischen Mitte Juli 2017 und Mitte August 2018 in einem Bohrloch die Felstemperatur in 10 cm Tiefe gemessen; diese Daten wurden freundlicherweise von Ingo Hartmeyer und Markus Keuschnig (GEORESEARCH Forschungsgesellschaft) zur Verfügung gestellt (vgl. auch Hartmeyer et al., 2020). Die Durchschnittstemperatur im Fels betrug  $-0,35 \pm 0,13$  °C (Minimum  $-0,65$  °C, Maximum  $-0,15$  °C; Abb. 9). Die ganzjährig negativen Temperaturen passen zur Beobachtung, dass der Fels der Randkluft auch ganzjährig stellenweise eisbedeckt ist

Beim erstmaligen Erreichen des Schachtbodens des *Forschungsschachts* am 24.1.2014 wurde die Temperatur des Eises an der Gletscherbasis bestimmt. Dazu wurde mit einem Bohrer ein Loch in das basale Eis gebohrt und in diesem die Temperatur mit einem Einstichthermometer gemessen. Diese Messung ( $-1,9$  °C) belegt, dass auch die Basistemperatur des Gletschers negativ ist, d.h. ein sogenannter kalter Gletscherbereich vorliegt. Darunter versteht man einen Gletscher, dessen Basis ganzjährig Temperaturen unterhalb des Druckschmelzpunktes von Eis aufweist und daher an seinem Felsbett angefroren ist (Benn & Evans, 2010).

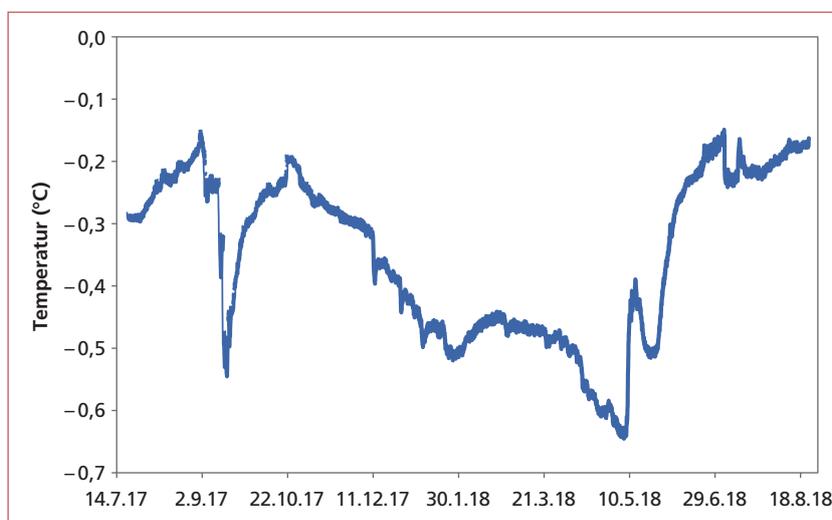


Abb. 9: Temperaturverlauf in 10 cm Tiefe im Fels der Randkluft des Natureispalasts über den Zeitraum von gut einem Jahr.  
Fig. 9: Rock temperature timeseries at a depth of 10 cm in the randkluft over about one year.

Die Koexistenz von Eis und Wasser belegt, dass weite Teile des Natureispalasts nahe am Nullpunkt liegen. Tatsächlich wurden von Tauchern wiederholt geringfügig negative Temperaturen im Wasser des *Eissees* registriert. Mit einem geeichten Thermometer wurde im Winter in ca. 0,5 m Wassertiefe eine Temperatur von  $-0,3\text{ °C}$  gemessen. Dieser Wert passt gut zur Beobachtung, dass sich über Nacht an der Seeoberfläche

stets eine dünne Eisschicht bildet, die händisch abgefischt wird, da ansonsten der See langsam von oben her zueisen würde. Eiskristallwachstum im leicht unterkühlten Wasser wurde auch an den Eiswänden in seichten Seebereichen festgestellt. Dieses Eis muss von Zeit zu Zeit weggeschremmt werden, da ansonsten die touristische Bootsfahrt auf dem *Eissee* nicht möglich wäre.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Spaltensystem des Natureispalasts liegt im Randklufbereich des Tuxer Ferners. Alle Beobachtungen, insbesondere die Temperatur- und Bewegungsmessungen, sprechen dafür, dass der Gletscher in diesem Bereich an seinem Felsbett angefroren ist, wenn auch die Temperaturen nur wenig unter dem Nullpunkt liegen. Die Fließbewegung eines solchen kalten Gletscherbereichs beschränkt sich auf das langsame deformationsbedingte Fließen innerhalb des Eises. Daraus resultieren deutlich geringere Beträge als beim Fließen der meisten alpinen, temperierten Gletscher, die an ihrer Basis am Druckschmelzpunkt sind und somit basales Gleiten aufweisen. Kalte Gletscher sind in den Ostalpen die Ausnahme (z.B. Bohleber et al., 2020); in den Westalpen finden sie sich aufgrund der größeren Seehöhe etwas häufiger (Haerberli et al., 2004; Bohleber et al., 2018).

Dank der kalten Natur im obersten Abschnitt des Tuxer Ferners sind die Bewegungsraten innerhalb des Natureispalasts gering und seine Gänge und Räume stabil, ganz im Gegensatz zu Gletscherhöhlen, die in Gletscherzungen z.B. durch subglaziale Bäche oder künstlich gebildet wurden. Ein weiterer Grund für die geringe Fließbewegung dieses Teils des Tuxer Ferners ist der Tatsache geschuldet, dass auf halber Strecke zum Riepen-sattel ein Felsrücken aus dem Gletscher ragt (Abb. 4). Dieser Felsriegel stellt ein Widerlager für den oberhalb (östlich) anschließenden Gletscherbereich dar und fördert dessen Stabilität. Das erklärt auch, weshalb der Tuxer Ferner hier keinen Bergschrund aufweist. Als Bergschrund werden ortsfeste Gletscherspalten bezeichnet, die sich im Kontaktbereich zwischen kaltem und warmem (basal gleitendem) Eis bilden. Auf der gegenüberliegenden Flanke des Gletschers, an der Ostwand des Olperers, finden sich hingegen Bergschrundspalten.

## DANK

Wir danken den ÖBF (Revier Unterinntal) und der Zillertaler Gletscherbahn GmbH & Co KG für die Unterstützung unserer Forschungsarbeiten, Ingo Hartmeyer und Markus Keuschnig (GEORESEARCH

Für die Ostalpen stellt der Natureispalast aufgrund seiner Seehöhe somit eine Ausnahmesituation einer Gletscherhöhle dar. Seine Zukunft ist für die kommenden Jahre gesichert, nicht zuletzt, da durch Aufstellen von Windzäunen am Gletscher die bedeutende Winderosion im Winter – Stichwort Windkolke – gesteuert und Verluste im Zuge der sommerlichen Schnee- und Eisschmelze durch Auftragen von Schnee mittels Pistengeräten kompensiert werden können. Steigen die Lufttemperaturen jedoch weiterhin so an wie seit Ende des 20. Jahrhunderts, so wird auch der Natureispalast in Bedrängnis geraten, da sein „Temperaturpuffer“ im Randklufbereich nur maximal ca.  $0,6\text{ °C}$  (Abb. 9) und an seiner Basis nur etwa  $1,9\text{ °C}$  beträgt. Dass die oberen Bereiche schon nahe an der Nullgradgrenze liegen, ist unschwer an der Existenz des *Eissees* und verschiedener Wasserzutritte im Sommer und im Herbst zu erkennen.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es neben dem Natureispalast zumindest noch eine weitere Gletscherhöhle am Tuxer Ferner gab. Sie lag im Bereich der Gletscherzunge südlich des Tuxerfernerhauses, d.h. knapp 600 m tiefer als der Natureispalast. Man konnte im Winter einige Zehnermeter an der Grenze Eis-Fels hineingehen bzw. -kriechen und streckenweise einem ehemaligen subglazialen Gletscherbachlauf folgen (Befahrung im November 1998 durch R. Erler, C. Anfang und C. Spötl). Westlich des Tuxerfernerhauses wurde in den 1990er Jahren überdies an der damaligen Gletscherstirn ein künstlicher Stollen von rund 30 m Länge angelegt, der touristisch genutzt wurde (z.B. Wolf, 1991). Im Zuge des Rückgangs des Gletschers verschwanden sowohl die Höhle südlich des Tuxerfernerhauses wie auch dieser Stollen.

Forschungsgesellschaft) für die Bereitstellung von Loggerdaten, Birgit Sattler für Diskussion und Friedl Obleitner sowie Andreas Wolf und Monika Schöner für die Durchsicht des Textes und nützliche Hinweise.

## LITERATUR

- Benn, D.I. & Evans, D.J.A. (2010): *Glaciers and Glaciation*. – 2. Aufl., London (Arnold).
- Bohleber, P., Schwikowski, M., Stocker-Waldhuber, M., Fang, L. & Fischer, A. (2020): New glacier evidence for ice free summits during the life of the Tyrolean Iceman. – *Sci. Rep.*, 10: 20513, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77518-9>.
- Bohleber, P., Hoffmann, H., Kerch, J., Sold, L. & Fischer, A. (2018): Investigating cold based summit glaciers through direct access to the glacier base: a case study constraining the maximum age of Chli Titlis glacier, Switzerland. – *The Cryosphere*, 12: 401–412.
- Ford, D.C. & Williams, P. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. – Chichester (J. Wiley).
- Glaser, S. (1988): Glaziomania. – *Der Schlaz*, 54: 54–65.
- Gulley, J.D. & Fountain, A.G. (2019): Glacier caves. – In: White, W.B., Culver, D.C., Pipan, T. (Hrsg.): *Encyclopedia of Caves*. – 3. Aufl., London (Elsevier): 468–473.
- Haeberli, W., Frauenfelder, R., Kääh, A. & Wagner, S. (2004): Characteristics and potential climatic significance of „miniature ice caps“ (crest- and cornice-type low-altitude ice archives). – *J. Glaciol.*, 50: 129–136.
- Hartmeyer et al., Helfricht, K., Leith, K., Keuschnig, M., Ewald, A., Delleske, R., Otto, J.-C. & Krautblatter, M. (2020): Research Project GlacierRocks. Glacier-headwall interaction and its influence on rockfall activity. Final Report (2017–2020). – <https://epub.oeaw.ac.at/?arp=0x003b9679>.
- Klebelsberg, R. (1920): Glazialgeologische Erfahrungen aus Gletscherstollen. – *Z. Gletscherk.*, 11: 156–184.
- Klimchouk, A. (2009): Caves. – In: Gunn, J. (Hrsg.): *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, New York (Fitzroy Dearborn): 203–205.
- Wachtler, M. & De Bernardin, A. (2009): Die Stadt im Eis. Der Erste Weltkrieg im Inneren der Gletscher. – Bozen (Athesia).
- Wolf, A. (1991): Ein Gletschereisbergwerk im Hintertuxer Gletscher? – *Der Schlaz*, 63: 21–22.
- Wolf, A. (2003): Die Gletschereishöhlen des Vernagtferners im Jahre 2002. – *Der Schlaz*, 63: 32–44.
- Wolf, A. (2005): Die Eiskapelle am Königssee (1334/5) – 20 Jahre Höhlenforschung im Gletschereis des Nationalpark Berchtesgaden. – *Karst und Höhle*, 2004/2005: 139–150.